

第2章 等価1質点系における鉄筋コンクリート建物の応答性状

2.1	はじめに.....	21
2.2	応答解析方法.....	22
2.2.1	地震動.....	22
2.2.2	履歴モデル.....	31
2.2.3	数値計算法.....	32
2.3	応答解析結果.....	33
2.3.1	弾塑性変位応答の傾向.....	33
2.3.2	無次元化パラメータに対する応答.....	34
2.3.3	弾塑性変位応答値のゾーニング.....	39
2.4	応答結果の検討.....	41
2.4.1	エネルギー的観点から見た変位応答.....	41
2.4.2	弾塑性系への入力エネルギー.....	43
2.4.3	減衰エネルギー.....	45
2.4.4	履歴エネルギー.....	48
2.4.5	累積率.....	53
2.4.6	変位応答.....	61
2.5	鉄筋コンクリート建物の変位応答.....	62
2.5.1	適用方法.....	62
2.5.2	トリリニア型復元力との対応.....	63
2.6	まとめ.....	67

2.1 はじめに

鉄筋コンクリート構造物は一般に剛性が高いため、耐震設計においても層せん断耐力、柱軸力等の力や強度の面に注目している事が多かった。しかし、最近では超高層建物のような長周期の構造物が増え、変形制限が設計を支配する例が見られるようになり、また、設計が靱性を考慮したものとなり、強震時の最大変形量や、最大層間変形角を予測する事が重要な課題となっている。

設計された建物の地震時の変形量は、部材モデルを用いた立体フレーム解析手法等により個々の部材レベルまで算定できるようになっている。しかし、解析には減衰や復元力特性等の仮定を多く含み、その仮定の仕方によっては応答変位が大きく変化する事が報告されている¹⁾。また、解析には個々の部材の弾塑性性状が設定されなければならないので、最終的な安全確認に用いられるのが一般的である。設計の初期段階で用いるには、単純で簡易なものほど有益であると考えられる。弾性応答スペクトルの値を用いる事ができれば、最も単純な方法となる。

弾塑性応答を推定する方法としては、すでに第1章にまとめたように数多くの研究がなされている。しかし、これらの研究結果は、限定された地震動加速度記録波形（以下地震動と記す）を用いて得られたものである。本章では、梁降伏の全体降伏系となるよう設計された建物を対象とし、超高層建物の設計に一般的に用いられている設計用入力地震動波形²⁾を用いて、各種バイリニアアの復元力特性を持つ1質点系の弾塑性応答解析をパラメトリックに行い、弾塑性変位応答の検討を行う。そして、1質点系の弾塑性変位応答と、弾性変位応答スペクトルとの関係を、強度、初期周期および地震動の周期特性によって定められる無次元パラメータにより定め、鉄筋コンクリート造の変位応答の簡易な推定法を示す。また、これらの無次元パラメータにより変位一定則が成り立つ領域が容易に判断できる事を示す。ここでの特徴は上記の無次元パラメータを用いる事により地震動の種類によらず同一の考え方ができる事を示す事にある。

2.2 応答解析方法

2.2.1 地震動

1) 応答スペクトル

本章において使用した地震動の加速度、速度、変位の最大値を表-2.1に、その変位応答スペクトルを図-2.1に示す。これらの地震動は一般に用いられている設計用地震動と、さらに、周波数特性が広く分布するように若干の地震動を加えたものである。速度、変位の最大値については、原記録、参考文献²⁾に記述のあるものについてはその値を、それ以外は積分による一方向ドリフト成分等を取り除くためFFTを用い、周波数領域でバンドパスフィルターをかけ、積分し、逆変換したものの最大値として求めた。尚、応答計算には原波形を用いた。

本章では、各地震動の2%減衰に対する応答スペクトルを、加速度応答スペクトル一定領域、速度応答スペクトル一定領域、変位応答一定領域の3つの領域に分け、加速度応答スペクトル一定領域と速度応答スペクトル一定領域の境界の周期を特性周期(T_c)と定義し、これで周波数特性を代表させる。特性周期を求めるための2%減衰の3折れ線スペクトルはNewmarkの提案³⁾のように地震動の最大値の定数倍として求めれば、応答スペクトルを計算しなくても定められるが、本章では次のようにして求めた。まず、10%減衰の速度応答スペクトル、変位応答スペクトルを求め、これを原点を通る直線で包絡する。この傾きより、擬似加速度、擬似速度スペクトル一定値を定め、道路橋示方書・同解説の減衰定数別補正係数⁴⁾を参考にして、1.67を乗じ2%減衰の応答スペクトル値とする。変位一定領域の値は、本章の対象建物の周期範囲を5秒までとし、それまでの10%減衰の変位応答スペクトルの最大値を1.67倍して求めた。これらの値を表-2.2に示す。また、これより求めた擬似変位応答スペクトルを図-2.1中に示す。おおむね2%減衰の変位応答スペクトルを近似しているが、一部の地震動では、速度スペクトル一定領域で2%減衰の変位応答スペクトル値をかなり下回っている部分がある。特性周期の範囲は、0.29~1.15 secの間に分布している。

表-2.1 使用した地震動の最大値

地震動名	地震動の最大値		
	加速度	速度	変位
	cm/sec ²	cm/sec	cm
El Centro NS	341.7	33.45	10.86
El Centro EW	210.14	36.92	19.78
Taft NS	152.7	15.72	6.69
Taft EW	175.95	17.71	9.15
Tokyo 101 NS	74.0	7.63	4.38
Sendai 501 NS	57.5	3.46	1.94
Sendai 501 EW	47.5	3.82	2.14
Osaka 205 EW	25.0	5.08	4.14
Hachinohe NS	225.0	34.08	11.44
Hachinohe EW	182.9	35.81	13.26
Tho30-1FL NS	258.2	36.17	14.52
Tho30-1FL EW	202.57	27.57	9.11
Castaic EW	310.66	16.26	2.59
Managua NS	317.52	29.48	6.66
Los Angeles NS	249.9	27.27	12.65
Santa Barbara EW	128.38	18.79	5.24

表-2.2 平滑化した2%減衰の応答スペクトル

地震動名	平滑化した応答スペクトルの最大値			境界の周期*	
	加速度	速度	変位	T _c	T ₂
	cm/sec ²	cm/sec	cm	sec	sec
El Centro NS	1209.85	109.67	36.27	0.57	2.08
El Centro EW	783.67	96.57	54.05	0.77	3.52
Taft NS	542.00	45.32	25.43	0.53	3.53
Taft EW	591.18	48.28	20.53	0.51	2.67
Tokyo 101 NS	201.84	22.63	6.57	0.70	1.82
Sendai 501 NS	226.78	10.52	3.02	0.29	1.80
Sendai 501 EW	215.23	13.61	3.31	0.40	1.53
Osaka 205 EW	124.21	13.35	7.41	0.68	3.49
Hachinohe NS	817.49	96.56	40.42	0.74	2.63
Hachinohe EW	803.17	119.11	47.93	0.93	2.53
Tho30-1FL NS	942.43	146.37	35.60	0.98	1.53
Tho30-1FL EW	955.69	82.12	33.23	0.54	2.54
Castaic EW	1014.31	57.56	9.08	0.36	0.99
Managua NS	1735.25	103.89	24.98	0.38	1.51
Los Angeles NS	874.79	106.10	55.75	0.76	3.30
Santa Barbara EW	344.27	62.86	20.35	1.15	2.03

* T_c: 加速度一定領域と速度一定領域の境界の周期(特性周期)

T₂: 速度一定領域と変位一定領域の境界の周期

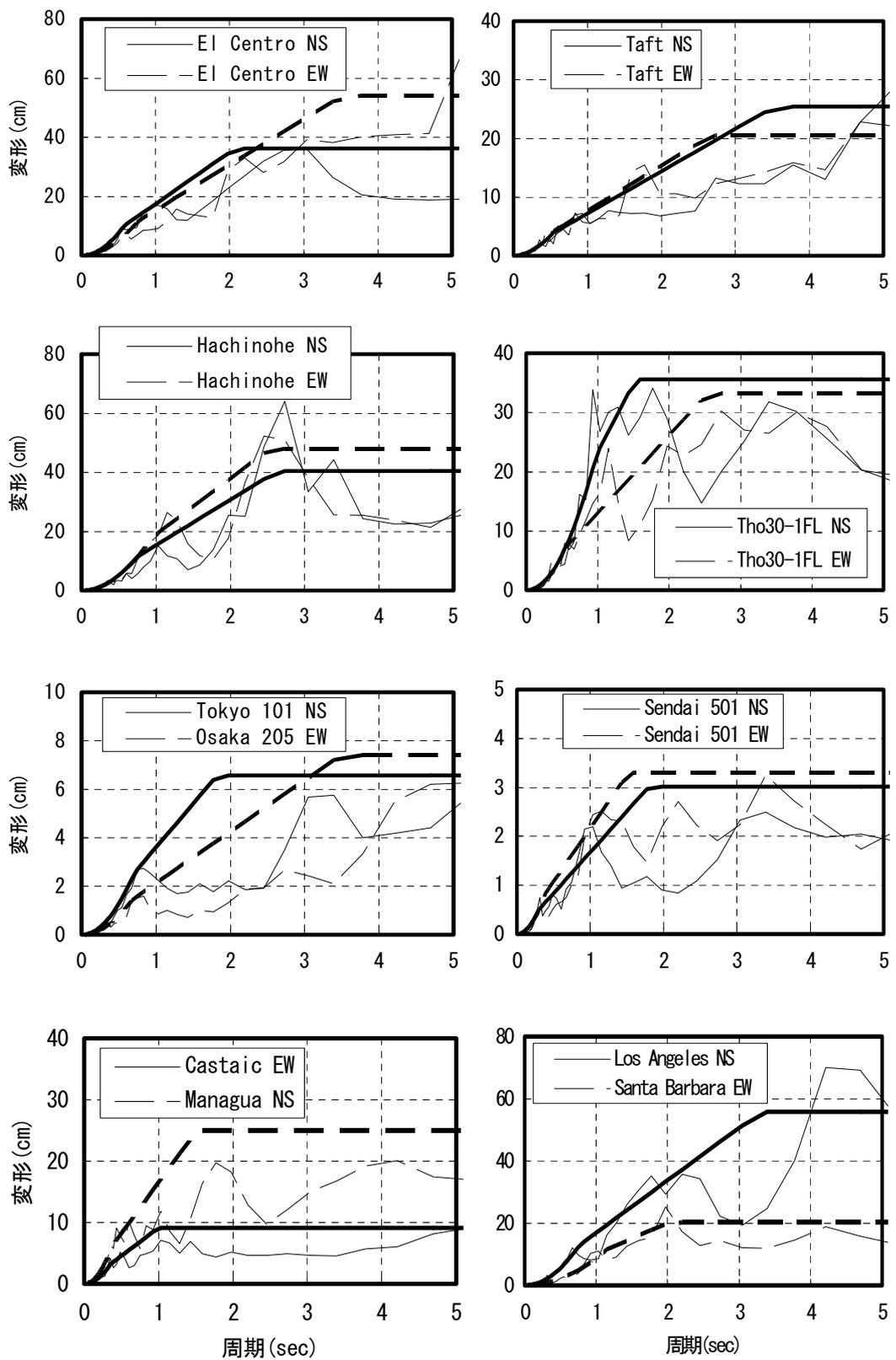


図-2.1 使用した地震動加速度記録波形の変位応答スペクトル（細線）と平滑化スペクトル（太線）

2) エネルギー入力

本章において、弾塑性応答をエネルギー的に考察するので、ここでエネルギー入力についての概要を示す。

1質点形の弾性応答の運動方程式は次式で与えられる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \quad \text{-----(2.1)}$$

ここで、

- m : 質量
- c : 減衰定数
- k : 剛性
- x, \dot{x}, \ddot{x} : 変形、速度、加速度
- \ddot{x}_g : 入力加速度

式(2.1)は、力の釣り合い方程式である。これを微小時間の Δt 間の微小変形 Δx におけるエネルギーの釣り合いに書き直すと、

$$m\ddot{x}(t) \cdot \Delta x + c\dot{x}(t) \cdot \Delta x + kx(t) \cdot \Delta x = -m\ddot{x}_g(t) \cdot \Delta x \quad \text{-----(2.2)}$$

$\Delta x = \dot{x} \cdot \Delta t$ であるので $\Delta t \rightarrow 0$ の時、時刻0から t までのエネルギー入力として積分表示すると、

$$m \int_0^t \ddot{x} \dot{x} dt + c \int_0^t \dot{x}^2 dt + k \int_0^t x \dot{x} dt = -m \int_0^t \ddot{x}_g \dot{x} dt \quad \text{-----(2.3)}$$

各項に部分積分を適用すると、

$$\frac{m}{2} [\dot{x}(t)]^2 + \frac{k}{2} [x(t)]^2 + c \int_0^t \dot{x}^2 dt = -m \int_0^t \ddot{x}_g \dot{x} dt \quad \text{-----(2.4)}$$

これは、次のように示せる。

$$\text{運動エネルギー} + \text{位置エネルギー} + \text{消散エネルギー} = \text{入力エネルギー}$$

これにより入力エネルギースペクトル E_m を求める事ができる。表-2.1に示した地震動のエネルギースペクトルを図-2.2に示す。なお、エネルギースペクトルは次式で与えられる等価速度として示される事が多く、図-2.2は、この等価速度で示している。

$$V_m = \sqrt{2E_m / m} \quad \text{-----(2.5)}$$

加速度等の応答スペクトルと異なり、減衰の増大は応答値の減少ではなく、スペクトルの平滑化を増している。

エネルギースペクトルは、フーリエ振幅スペクトルからでも求められる⁵⁾。

フーリエ変換方程式は、

$$\begin{aligned} \ddot{X}_g(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \ddot{x}_g(t) e^{-i\omega t} dt \\ \dot{X}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \dot{x}(t) e^{-i\omega t} dt \end{aligned} \quad \text{-----(2.6)}$$

また、Parseval'sの等式は、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \overline{f(t)} g(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{F(\omega)} G(\omega) d\omega \quad \text{-----(2.7)}$$

ここで、上線は共役複素数を示し、 $F(\omega), G(\omega)$ は $f(t), g(t)$ のフーリエ変換を示している。

式(2.4)に示されているように、応答エネルギーは質量、地動加速度、質量の相対速度を変数として0時間から地震動の終了時間までの積分によって与えられる。地動加速度は、地震の前と後では0と考えてさしつかえないので、積分の範囲を $-\infty$ から ∞ に拡張すると、応答エネルギー RE は、

$$RE = -m \int_{-\infty}^{\infty} \dot{x} \ddot{x} dt \quad \text{-----(2.8)}$$

複素数表示すると、

$$RE = -m \cdot \text{Re} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \dot{X} \ddot{X} dt \right] \quad \text{-----(2.9)}$$

この式に、Parseval'sの等式を適用すると、応答エネルギーを周波数領域で求める事ができる。

$$RE = -\frac{m}{2\pi} \cdot \text{Re} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}(\omega) \cdot \ddot{X}(\omega) d\omega \right] \quad \text{----- (2.10)}$$

速度の共役複素数は、加速度の共役複素数と周波数速度応答関数 $H(\omega)$ により次式で与えられるので、

$$\dot{X}(\omega) = -i\omega \cdot H(\omega) \cdot \ddot{X}_g(\omega) \quad \text{----- (2.11)}$$

(2.10)式は次のように書ける。

$$RE = \frac{m}{2\pi} \text{Re} \left[\int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) \cdot \ddot{X}_g(\omega) \cdot \ddot{X}_g(\omega) d\omega \right] \quad \text{----- (2.12)}$$

(2.12)式の地動加速度部分は、共役複素数の積なので、

$$RE = \frac{m}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [i\omega \cdot H(\omega)] |\ddot{X}_g(\omega)|^2 d\omega \quad \text{----- (2.13)}$$

周波数速度応答関数を展開すると、

$$RE = \frac{m}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{i\omega}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2ih\omega_0\omega} \right] |\ddot{X}_g(\omega)|^2 d\omega \quad \text{----- (2.14)}$$

ここで、 ω はシステムの周波数 ($\sqrt{k/m}$) であり、 h は減衰常数である。

周波数応答関数部分の分母分子に $(\omega_0^2 - \omega^2 - 2ih\omega_0\omega)$ を乗じて実数を取り出すと、

$$RE = \frac{m}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2h\omega_0\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4h^2\omega_0^2\omega^2} |\ddot{X}_g(\omega)|^2 d\omega \quad \text{----- (2.15)}$$

ここで、重み関数として次式 (図-2.3) を定義すると、

$$W(\omega) = \frac{2h\omega_0\omega}{\pi[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4h^2\omega_0^2\omega^2]} \quad \text{----- (2.16)}$$

(2.15)式は、簡潔な表示の次式となる。

$$RE = \frac{m}{2} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) |\ddot{X}_g(\omega)|^2 d\omega \quad \text{----- (2.17)}$$

これより、エネルギースペクトルはフーリエ振幅スペクトルの2乗を周波数応答関数を重み関数として平滑化した物であるといえ、フーリエ位相スペクトルには無関係であるといえる。これは、応答が一方向にシフトする原因が地震動波形のフーリエ位相スペクトルに影響されるとの研究⁶⁾を考慮すると、応答をエネルギーのみで評価する事が適さない場合がある事を示している。

時刻歴解析においては、計算ステップにおいて(2.2)式の左辺をそれぞれ求め加えていけばよい。この過程での最大値をある周期と減衰でのエネルギー入力スペクトル値とする。入力エネルギーは単調増加関数ではなく、非減衰系においては最大値は応答の最後とは限らない。(2.17)式で与えられるエネルギーは応答の最終値であるので、厳密には時刻歴解析の結果の最大値とは同じとならない。しかし、減衰のあるシステムにおいては、最終値がほぼ最大値となっている。

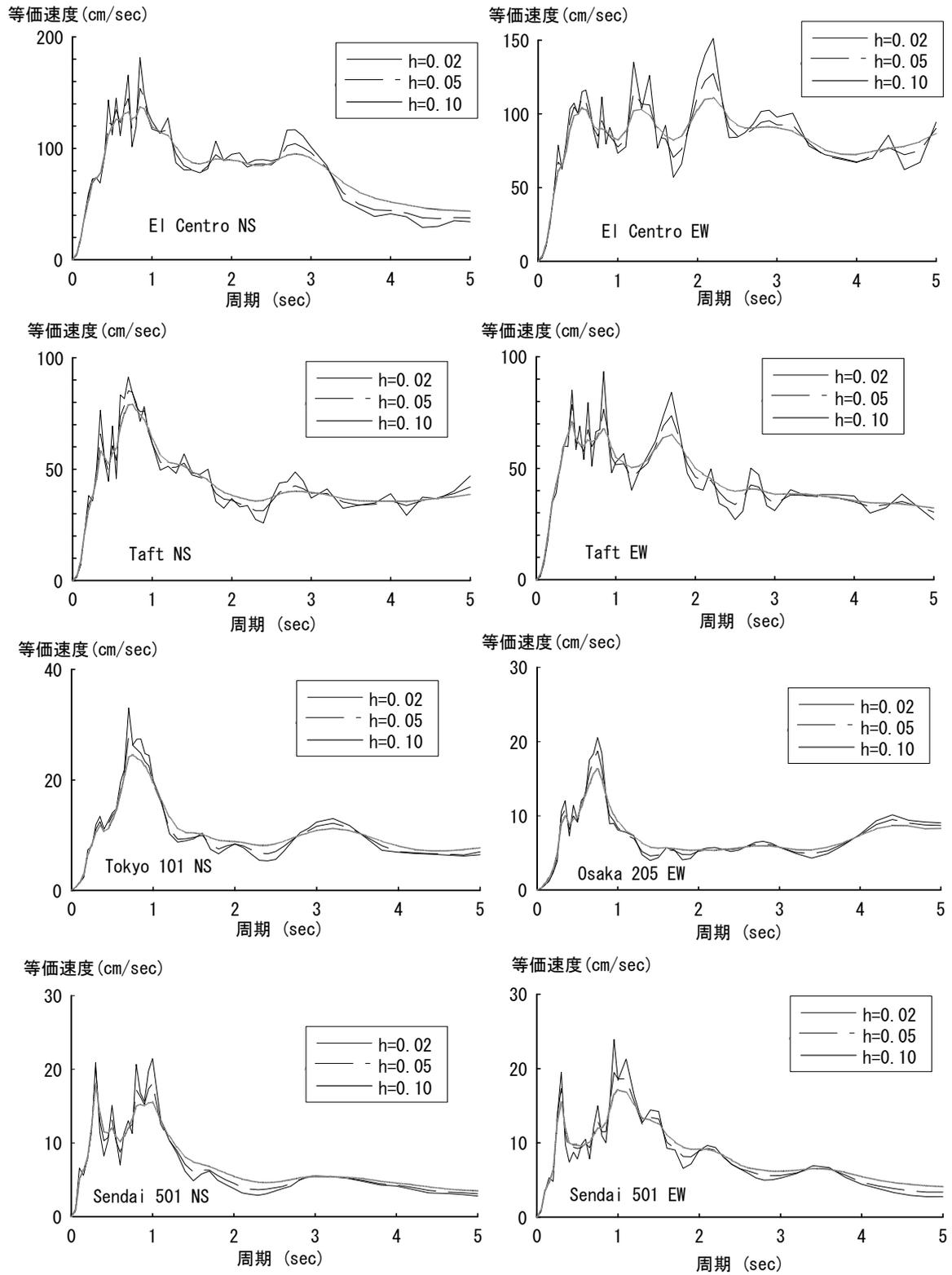


図-2.2(a) 使用した地震動加速度記録波形のエネルギースペクトル(1)

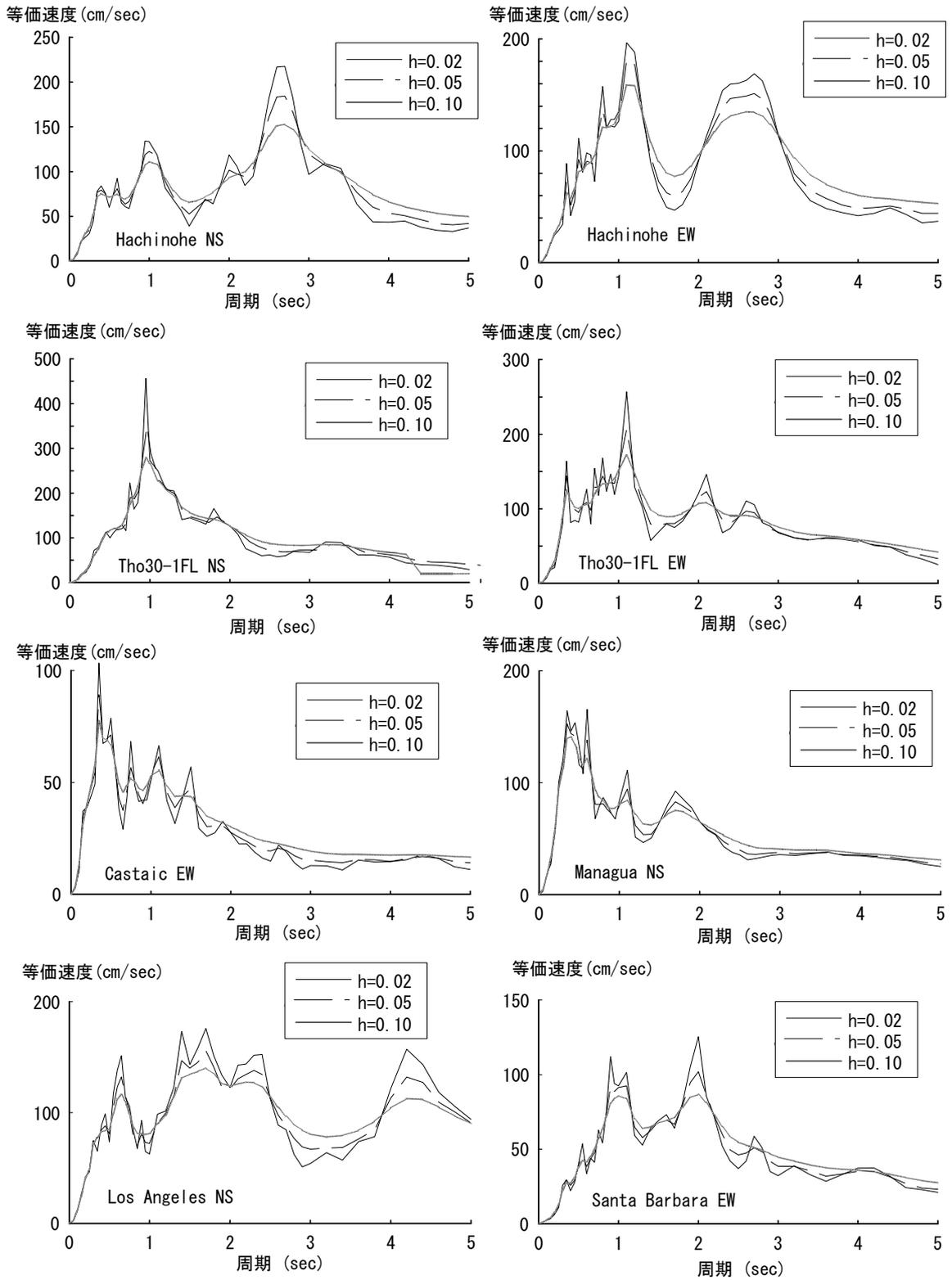


図-2.2(b) 使用した地震動加速度記録波形のエネルギースペクトル(2)

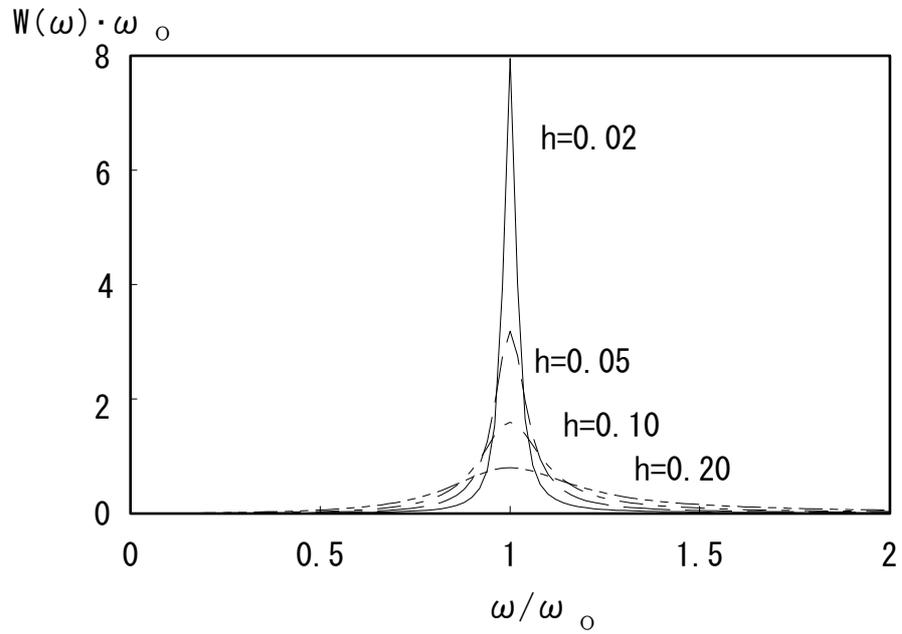


図-2.3 エネルギースペクトルに対する重み関数

2.2.2 履歴モデル

鉄筋コンクリート構造は一般的にはトリリニア一型の復元力特性モデルが用いられるが、第1折れ点に関するパラメータが増えるため、簡便性という観点より本章ではバイリニア一型の復元力モデルを用いた。また、降伏後の剛性は基本的に0とした。梁降伏型の鉄筋コンクリート構造を等価1質点系に縮約し、バイリニア一型の復元力特性を用いて応答解析を行った場合、最大応答変位については実験結果とよく対応することがSaidiら⁷⁾によって示されている。また小谷⁸⁾は降伏後の剛性が応答に与える影響についてTakedaモデル⁹⁾を用いた検討により、降伏周期が長い場合には影響はほとんどなく、短い場合でも降伏剛性の5%以下ならば影響の少ないことを示している。従って、これらの復元力特性により鉄筋コンクリート構造の最大変位応答の検討が可能であるといえる。

バイリニア一型の復元力特性の初期周期としては、図-2.4に示すように弾性周期(T_i)、降伏点周期(T_y)、とその中間の周期として履歴面積が同じになるようにしたエネルギー等価周期(T_e)が考えられる。直感的には T_e を用いるのが良いと思われるが、簡便性のため本章では弾性周期(T_i)を用いる。実際の建物に適用するときにはこれに対する検討が必要であり、2.4において検討を行う。

本章で用いた5種類の履歴モデルを図-2.5に示す。モデル2~4が曲げ降伏する鉄筋コンクリート構造物を想定したモデルである。モデル2は、Cloughら¹⁰⁾によって提案されたモデルで、簡易である上に鉄筋コンクリート構造物の挙動をよく表すとされている。モデル3は小谷⁸⁾によって用いられており、Takedaモデル⁹⁾の簡易モデルと考えることができる。モデル2との相違は、除荷時の剛性を最大変位の関数として変化させられることであり、これによって履歴吸収エネルギーを調整できる。本章では、このモデルを鉄筋コンクリート建物の平均的な履歴モデルとして考える。モデル4は、モデル3にスリップ性状を加味したものであり、武田スリップモデル¹¹⁾の簡易モデルと考える。本研究においては、スリップ時の剛性を零と仮定した。

モデル1は、よく知られている弾塑性モデルであり、モデル5は弾塑性スリップモデルである。この両者のモデルは、履歴吸収エネルギーの最大、最小を表すモ

デルとして用いた。

2.2.3 数値計算法

数値計算は Newmarkの β 法¹²⁾ ($\beta = 1/6$) とし積分刻みは 0.01secと初期周期の1/20のうち小さい方とした。履歴特性の折れ曲がり点においては、運動方程式と履歴モデルの両者を満足するように繰り返し計算を行った。減衰は弾性時で2%とし、瞬間剛性に比例するものと仮定した。

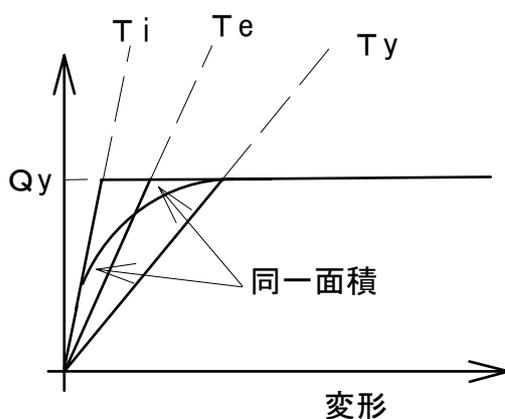


図-2.4 バイリニアー復元力の設定

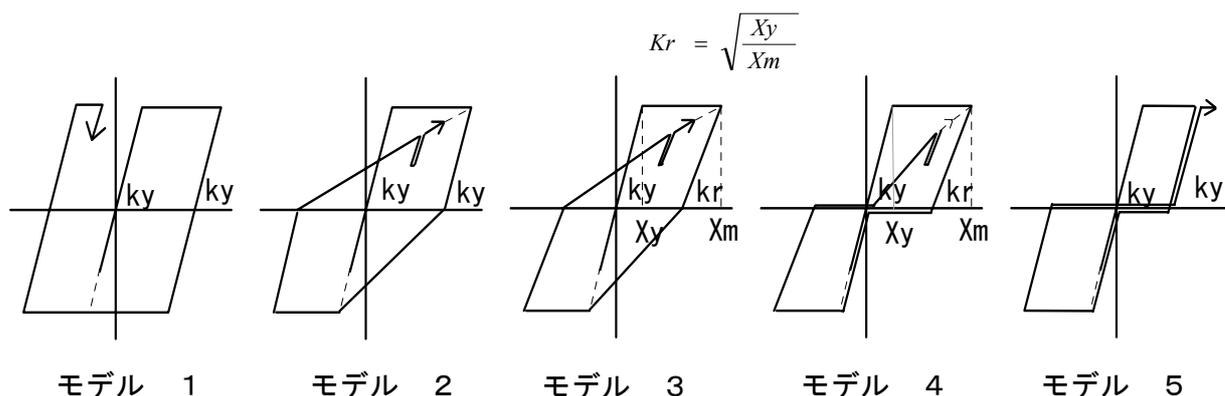


図-2.5 使用したバイリニアー復元力特性モデル

図-2.1 使用した地震動加速度記録波形の変位応答スペクトル（細線）と 平滑化スペクトル（太線）	24
図-2.2(A) 使用した地震動加速度記録波形のエネルギースペクトル(1).....	28
図-2.2(B) 使用した地震動加速度記録波形のエネルギースペクトル(2).....	29
図-2.3 エネルギースペクトルに対する重み関数.....	30
図-2.4 バイリニアール復元力の設定.....	32
図-2.5 使用したバイリニアール復元力特性モデル.....	32
表-2.1 使用した地震動の最大値.....	23
表-2.2 平滑化した2%減衰の応答スペクトル.....	23